

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
29. September 2005 (29.09.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/091326 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01J 35/00**

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **YXLON INTERNATIONAL SECURITY GMBH**
[DE/DE]; Heselstücken 3, 22453 Hamburg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/002989

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. März 2005 (21.03.2005)

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **HARDING, Geoffrey**
[GB/DE]; Jevenstedter Str. 170 D, 22547 Hamburg (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(74) Anwalt: **DTS MÜNCHEN**; St.-Anna-Strasse 15, 80538
München (DE).

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

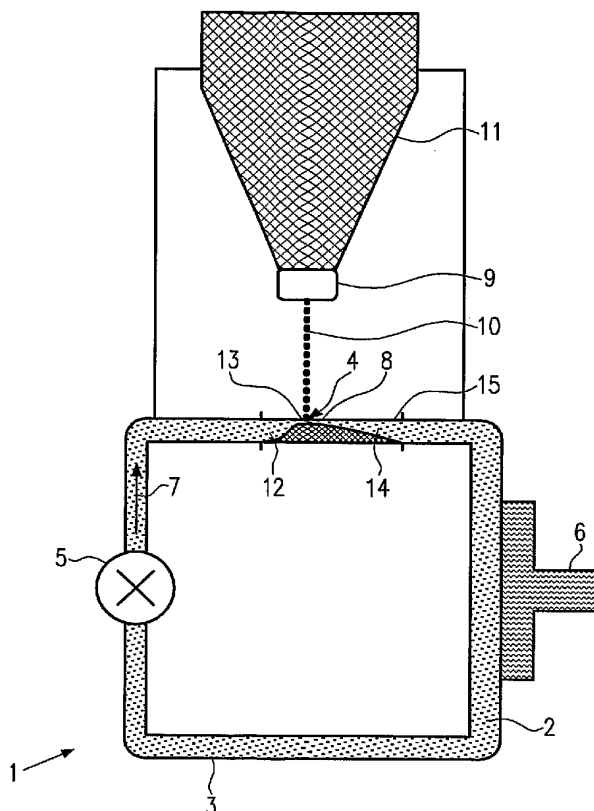
(30) Angaben zur Priorität:
10 2004 013 618.1 19. März 2004 (19.03.2004) DE

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: X-RAY EMITTER, LIQUID-METAL ANODE FOR AN X-RAY SOURCE AND METHOD FOR OPERATING A
MAGNETOHYDRODYNAMIC PUMP FOR THE SAME

(54) Bezeichnung: RÖNTGENSTRAHLER, FLÜSSIGMETALLANODE FÜR EINE RÖNTGENQUELLE SOWIE VERFAH-
REN ZUM BETRIEB EINER MAGNETOHYDRODYNAMISCHEN PUMPE HIERFÜR



(57) Abstract: The invention relates to a method for operating a magnetohydrodynamic pump (5) for a liquid-metal anode (1) of an X-ray source. According to the invention, said pump can be operated in at least two modes, the first mode being a fusion mode, in which the liquid metal (2) is fused in a conduit (3) of the liquid-metal anode (1) and the second mode being an operation mode, in which the liquid metal (2) is pumped through the conduit (3) and X-ray radiation is generated. The invention also relates to a liquid-metal anode (1) for an X-ray source comprising: a liquid metal (2) that is contained in a conduit (3), an anode module (15) being inserted into the conduit (3) in the focusing region (4); a pump (5) for circulating the liquid metal (2) in the conduit (3); and a cooling system (6) for the liquid metal (2). According to the invention, a liquid-metal anode (1) of this type comprises a magnetohydrodynamic pump (5) that is configured as above.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung befasst sich mit einem Verfahren zum Betrieb einer magnetohydrodynamischen Pumpe 5 für eine Flüssigmetallanode 1 einer Röntgenquelle. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass sie in mindestens zwei Moden betreibbar ist, wobei der erste Modus ein Aufbaumodus ist, in dem das Flüssigmetall 2 in einer Leitung 3 der Flüssigmetallanode 1 geschmolzen wird, der zweite Modus ein Betriebsmodus ist, in dem das Flüssigmetall 2 durch die Leitung 3 gepumpt wird und die Erzeugung von Röntgenstrahlen erfolgt. Darüber hinaus befasst sich die Erfindung mit einer Flüssigmetallanode 1 für eine Röntgenquelle mit einem Flüssigmetall 2, das sich in einer Leitung 3 befindet, wobei ein Anodenmodul 15 im Fokusbereich 4 in die Leitung

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/091326 A2



CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Röntgenstrahler, Flüssigmetallanode für eine Röntgenquelle
sowie Verfahren zum Betrieb einer magnetohydrodynamischen
Pumpe hierfür

5

Die Erfindung befasst sich mit einem Verfahren zum Betrieb
einer magnetohydrodynamischen Pumpe für eine Flüssigmetall-
anode einer Röntgenquelle, mit einer Röntgenanordnung sowie
mit einer Flüssigmetallanode für eine Röntgenquelle mit einem
10 Flüssigmetall, das sich in einer Leitung befindet, wobei ein
Teil der Leitung als Fokusbereich ausgebildet ist, und mit
einer Pumpe zum Umwälzen des Flüssigmetalls in der Leitung
sowie mit einer Kühlung für das Flüssigmetall.

15

Seit kurzem ist es bekannt, Röntgenstrahlen nicht über eine
feste Metallanode, die mit Elektronen beschossen wird, zu er-
zeugen, sondern mit einer Flüssigmetallanode. Diese Technolo-
gie wird LIMAX (Liquid Metal Anode X-ray) genannt. Eine sol-
che Flüssigmetallanode benötigt für ihren Betrieb die folgen-
20 den Komponenten. In einer Leitung befindet sich ein Flüssig-
metall, das eine hohe, mittlere Atomzahl aufweisen muss, um
eine gute Röntgenausbeute beim Beschuss mit Elektronen zu er-
zielen. In die Leitung ist um den Fokusbereich herum ein Ano-
denmodul eingesetzt, in dem der Elektronenstrahl auf das
25 Flüssigmetall auftrifft und die Röntgenstrahlung erzeugt
wird. An dieser Stelle muss das Anodenmodul so ausgebildet
sein, dass es nur eine geringere Wechselwirkung mit den durch
es hindurchtretenden Elektronen aufweist. Dies wird regelmä-
ßig mit einem sogenannten Elektronenfenster erreicht, in dem
30 die hindurchtretenden Elektronen nur geringfügig abgebremst
werden. Um die im Fokusbereich entstehende Wärme abzuführen,
wird eine Pumpe verwendet, die das Flüssigmetall durch die
Leitung und somit auch den Fokusbereich umwälzt. Wird ein ge-
schlossener Kreislauf des Flüssigmetalls verwendet, wird über
35 einen Wärmetauscher eine Abkühlung des aufgeheizten Flüssig-
metalls erreicht. Aufgrund der vorgegebenen Rahmenbedingungen
ist es – wie oben schon aufgeführt – nötig, dass das Flüssig-

metall eine hohe, mittlere Atomzahl aufweist und darüber hinaus einen mittleren Schmelzpunkt hat. Des Weiteren muss die Flüssigmetallanode äußerst kompakt aufgebaut sein. Es ergeben sich somit für die Gesamtheit der vorbezeichneten einzelnen
5 Teile der Flüssigmetallanode bezügliche ihrer Interaktionen starke Beschränkungen, da die einzelnen Teile gut zusammenpassen müssen. Dies gilt insbesondere auch für die Pumpe zum Umwälzen des Flüssigmetalls.

10 Aufgabe der Erfindung ist es, einzelne Teile einer Flüssigmetallanode beziehungsweise ein Gesamtsystem zur Verfügung zu stellen, das eine gute Arbeitsweise der Flüssigmetallanode ermöglicht, wobei die Einzelteile der Flüssigmetallanode gut aufeinander abgestimmt sind.

15 Die Aufgabe wird durch ein Verfahren zum Betrieb einer magnetohydrodynamischen Pumpe mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Um besonders gut und sicher im ausgeschalteten Zustand transportiert werden zu können, muss das Flüssigmetall einer erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode bei Zimmertemperatur fest sein. Im Betrieb dagegen muss das Flüssigmetall flüssig sein. Dadurch ergibt sich das Problem, dass
20 zwischen dem Betriebsmodus und dem Ruhemodus eine Verflüssigung beziehungsweise Erstarrung des Flüssigmetalls erfolgen muss, was entweder über Wärm- und Kühlelemente an der Leitung der Flüssigmetallanode geschehen kann oder erfindungsgemäß durch unterschiedliche Moden im Betrieb der magnetohydrodynamischen Pumpe. Durch den Auftaumodus wird das im Ruhemodus und bei Zimmertemperatur feste Flüssigmetall in der Leitung
30 geschmolzen. Im Auftaumodus wird der Motor der Pumpe ständig abwechselnd an- und ausgeschaltet. Dadurch werden im festen Flüssigmetall Wirbelströme induziert, die sich graduell verteilen und zu einer ohmschen Erwärmung des Flüssigmetalls führen. Dies wird dann so lang fortgesetzt, bis das gesamte
35 Flüssigmetall geschmolzen ist. Dagegen liegt im Betriebsmodus ein geschmolzenes Flüssigmetall vor, das durch die Leitung

gepumpt wird. In diesem Betriebsmodus erfolgt die Erzeugung von Röntgenstrahlen.

5 Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass im Auftaumodus über einen Sensor erfasst wird, ob der flüssige Zustand des Flüssigmetalls erreicht ist. Dadurch kann sehr exakt eine möglichst frühzeitige Umschaltung vom Auftaumodus in den Betriebsmodus erfolgen, nachdem das gesamte Flüssigmetall geschmolzen wurde und sich somit im flüs-
10 sigen Zustand befindet.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass ein dritter Modus als Hochfahrmodus vorhanden ist, in dem die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe gesteigert
15 wird. Dadurch wird ein langsames graduell ansteigendes Umwälzen des geschmolzenen Flüssigmetalls erreicht und die Pumpe muss nicht übermäßig und schlagartig ihre volle Leistung erbringen. Besonders bevorzugt geschieht dies dadurch, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe gesteigert wird, bis
20 das Flüssigmetall seine normale Flussgeschwindigkeit aufweist.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass ein vierter Modus als Herunterfahrmodus vorhanden
25 ist, in dem nach der Erzeugung von Röntgenstrahlen die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe stufenweise verringert wird. Dadurch wird vermieden, dass sich in der Leitung Druckwellen bilden, die beispielsweise zu einem Zerbersten des Elektronenfensters im Fokusbereich führen können. Damit wird die ge-
30 samte Flüssigmetallanode in ihrer Lebensdauer erheblich erhöht. Bevorzugt wird die stufenweise Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe erst dann vorgenommen, wenn die Temperatur des Flüssigmetalls unter einen vorgebbaren Schwellenwert sinkt, der insbesondere weniger als 50 °C ober-
35 halb des Schmelzpunkts des Flüssigmetalls liegt.

Des Weiteren wird die Aufgabe durch eine Flüssigmetallanode für eine Röntgenquelle mit den Merkmalen des Patentanspruchs 8 gelöst. Die hierzu eingesetzte Pumpe, die nach einem erfindungsgemäßen Verfahren gemäß den vorstehenden Ausführungen arbeitet, ist besonders gut für eine Flüssigmetallanode geeignet.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass als Flüssigmetall eine Bi-Legierung insbesondere BiPb oder BiPbInSn, verwendet wird. Dies hat zum einen den Vorteil, dass keine quecksilberhaltigen Verbindungen verwendet werden müssen, die aus Gesundheitsgründen in vielen Staaten mittlerweile verboten sind. Die genannten Bi-Legierungen weisen neben ihrer hohen mittleren Atomzahl auch einen Schmelzpunkt auf, der im Ruhemodus ein Erstarren des Flüssigmetalls gewährleistet. Der Schmelzpunkt von BiPb liegt bei 125°C und der von BiPbInSn bei 55,5°C. Besonders bevorzugt liegt der Gewichtsanteil des Bi in der BiPb-Legierung zwischen 50 und 60 Gew.%, insbesondere bei 55,5 Gew.%, und der Rest ist Pb. Bei einer Verwendung einer BiPbInSn-Legierung ist es in der Regel besonders bevorzugt, wenn die BiPbInSn-Legierung einen Anteil Bi von 49,4 Gew.%, Pb von 18,8 Gew.%, In von 21,0 Gew.% und Sn von 11,6 Gew. % aufweist.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Leitung aus Molybdän ist. Da Bismut-Legierungen Stahlrohre korrodieren, wenn die Temperatur der Bismut-Legierung im Bereich einiger hundert Grad liegt – was bei einem Beschuss mit Elektronen im Fokusbereich während des Betriebs normal ist – wird dies bei der Verwendung einer Molybdän-Leitung vermieden.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass das Anodenmodul vollständig aus Molybdän ist und ein Elektronenfenster darin eingesetzt ist, das aus lichtdurchlässigem kubischen Bornitrid – T-cBN – besteht. Dadurch wird gewährleistet, dass durch die flüssige Bismut-Legierung

auch im Fokusbereich keine Korrosion der Leitung erfolgt. Das Elektronenfenster, das regelmäßig mit dem Fokusbereich verlötet ist, weist sehr ähnliche Wärmeausdehnungskoeffizienten wie Molybdän auf, die jeweils im Bereich von $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ liegen. Dadurch werden bei einer Erhitzung Zugspannungen vermieden, die das Elektronenfenster zum Springen bringen könnten. Außerdem weist das T-cBN eine hohe Wärmeleitfähigkeit von $300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ auf. Besonders bevorzugt ist die Dicke des Elektronenfensters $40 \mu\text{m}$.

Eine weitere vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Kühlung ein Querstrom-Wärmetauscher in Minikanalbauweise ist. Damit ist auch bei geringem Platz für die gesamte Flüssigmetallanode eine gute Kühlung des heißen Flüssigmetalls möglich.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden anhand des näher in der Figur dargestellten Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode beschrieben. Die einzige Figur zeigt:

Eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode inklusive Elektronenquelle.

In der Figur ist eine erfindungsgemäße Flüssigmetallanode 1 schematisch dargestellt, wie sie in Relation zu einer Kathode 9 angeordnet ist. Die Kathode 9 ist an einem Hochspannungsisolator 11 angebracht und dient zur Erzeugung eines Elektronenstrahls 10, der auf die Flüssigmetallanode 1 trifft und dort zur Erzeugung von Röntgenstrahlen verwendet wird.

Bei vielen Anwendungen im Bereich der zerstörungsfreien Analyse und der Sicherheitsüberwachung von Gepäckstücken ist es notwendig, dass die Röntgenquelle eine Röntgenstrahlung über eine beachtliche Zeitspanne, teilweise über mehrere Stunden, erzeugt. Deswegen ist es bei Flüssigmetallanoden 1 notwendig, dass das Flüssigmetall 2 kontinuierlich durch die Leitung 3

der Flüssigmetallanode 1 zirkuliert. Dazu weist sie eine Pumpe 5 auf, die das Flüssigmetall 2 in der Leitung 3 umwälzt. Darüber hinaus ist auch eine Kühlung 6 nötig, um das Flüssigmetall 2 abzukühlen, welches im Fokusbereich 4 – wo der Elektronenstrahl 10 auf die Flüssigmetallanode 1 trifft – stark erwärmt wird. Des Weiteren ist es nötig, dass die Röntgenquelle und somit auch die Flüssigmetallanode 1 problemlos und sicher von einem Ort zu einem anderen Ort transportiert werden kann, ohne dass für den Betrieb wesentliche Teile kaputt gehen. Hierbei ist insbesondere an ein Elektronenfenster 8 gedacht, durch welches der Elektronenstrahl 10 im Anodenmodul 15 zum Flüssigmetall 2 vordringt. Bei einer Verwendung von Potentialen im Bereich von 200 kV wird normalerweise ein gegenpoliger Hochspannungsgenerator verwendet, in dem das Gehäuse auf Erdpotential gehalten wird, aber die Flüssigmetallanode 1 und die Kathode 9 symmetrisch auf entgegengesetzten Potentialen bezüglich des Erdpotentials gehalten werden. Dadurch ist es nötig, dass die Flüssigmetallanode 1, insbesondere ihre Leitung 3, sehr kompakt ausgeführt ist, damit sie leicht in die auf dem negativen Hochspannungspotential gehaltenen Terminal des gegenpoligen Hochspannungsgenerators montiert werden kann.

Dafür ist es nötig, die Flüssigmetallanode 1 mit Komponenten auszugestalten, die im Folgenden im Einzelnen näher beschrieben werden.

Um eine hohe Ausbeute an Röntgenstrahlen zu erhalten, muss ein Flüssigmetall 2 mit einer hohen Atomzahl verwendet werden. Das früher bevorzugte Quecksilber kann aufgrund seiner gesundheits- und umweltgefährdenden Nebenwirkungen nicht mehr verwendet werden. Deshalb wird in der erfindungsgemäßen Flüssigmetallanode 1 eine Legierung verwendet, die Bismut oder Blei enthält. Bevorzugt wird dabei eine Legierung, die sowohl Bismut als auch Blei enthält. Als besonders bevorzugt wird ein Flüssigmetall aus BiPb verwendet, mit einem Anteil von 55,5 Gew.% Bi und den Rest Pb. Diese Legierung weist einen

Schmelzpunkt von 125°C auf. Eine andere besonders bevorzugte Legierung ist BiPbInSn mit einem Anteil von 49,4 Gew.% Bi, 18,0 Gew.% Pb, 21,0 Gew.% In und der Rest Sn. Diese Legierung weist einen Schmelzpunkt von 55,5°C auf. Damit ist das verwendete Flüssigmetall 2 bei Raumtemperatur fest und eine Flüssigmetallanode 1 mit einem solchen Flüssigmetall 2 kann sicher transportiert werden, ohne dass die Gefahr besteht, dass das Elektronenfenster 8 bei normalen Vorsichtsmaßnahmen bricht. Darüber hinaus haben die beiden vorgenannten Legierungen den Vorteil, dass sie beim Erstarren ihr Volumen verringern. Damit wird vermieden, dass die Leitung 3, insbesondere das dünne Elektronenfenster 8 gesprengt wird, wie dies beispielsweise bei dem sich beim Gefrieren ausdehnenden Wasser der Fall wäre. Darüber hinaus weisen die beiden Ausführungsbeispiele der Legierungen jeweils Blei und Bismut auf, die beide einen hohen Dampfdruck aufweisen. Ein Riss im Elektronenfenster 8 im Betriebsmodus – wenn das Flüssigmetall 2 in flüssiger Form durch die Leitung 3 gepumpt wird – kann dann sehr leicht festgestellt werden, indem die Qualität des Vakuums in der Röntgenröhre überwacht wird.

Bei der Verwendung einer Indium-Legierung als Flüssigmetall 2 kann für die Leitung 3 kein Stahl verwendet werden, da Indium bei einer Temperatur von 100°C – wie dies im Betriebsmodus durchaus der Fall ist – Stahlleitungen korrodiert. Um eine solche Korrosion zu verhindern, wird die Leitung 3 und das gesamte Anodenmodul 15 aus Molybdän gefertigt. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass es hinsichtlich seines Wärmeausdehnungskoeffizienten auf das weiter unten beschriebene Elektronenfenster 8 hervorragend abgestimmt ist. Darüber hinaus weist eine Leitung 3 aus Molybdän eine geringe magnetische Permeabilität auf, was für die einwandfreie Funktion der Pumpe 5 – wie nachfolgend beschrieben – wichtig ist.

Das Anodenmodul 15 ist in seinem Fokusbereich 4 folgendermaßen ausgebildet. Der Kathode 8 zugewandt weist es ein Elektronenfenster 8 auf. Durch dieses Elektronenfenster 8 tritt

der Elektronenstrahl 10, um mit dem Flüssigmetall 2 in Wechselwirkung zu treten und somit Röntgenstrahlen zu erzeugen. Bisher sind als Elektronenfenster 8 entweder dünne Metallfolien aus Wolfram oder Molybdän sowie Diamantfilme bekannt.

- 5 Die bekannten Metallfolien sind jedoch anfällig für Ermüdungsrisse. Die Diamantfilme haben den Nachteil, dass sie in ihrem Wärmeausdehnungskoeffizienten – der bei circa $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ liegt – einen sehr großen Unterschied zu dem Material des Anodenmoduls 15 – nämlich Molybdän mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – aufweist. Dieser Unterschied führt zu Spannungen im Elektronenfenster 8, da es normalerweise bei einer Temperatur von 1.100°C mit dem Anodenmodul 15 verlötet ist. Dadurch ergibt sich eine äußerst unvorteilhafte Verkürzung der Lebensdauer und eine hohe Druckempfindlichkeit des Fokusbereichs 4. Im Ausführungsbeispiel wird
10 deswegen ein Elektronenfenster 8 verwendet, das aus einem T-cBN besteht, das in einer ähnlichen Art wie ein Kühlkörper für eine Hochleistungslaseranode verwendet wird. Das T-cBN besitzt gegenüber dem oben genannten Elektronenfenster 8 den
15 Vorteil einer hohen Wärmeleitfähigkeit im Bereich von $300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in Verbindung mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dieser Wärmeausdehnungskoeffizient stimmt mit dem des Molybdän überein, aus dem das Anodenmodul 15 – auch im Bereich des Fokusbereichs 4 – besteht. Um möglichst nur
20 einen geringen Energieverlust und kaum Wechselwirkung des Elektronenstrahls 10 im Elektronenfenster 8 zu erhalten, ist das Elektronenfenster 8 nur $40\mu\text{m}$ dick.

- Das Anodenmodul 15 weist im Fokusbereich 4 in Flussrichtung 7
30 nacheinander einen Konfusorbereich 12, einen Wechselwirkungsbereich 13 und einen Diffusorbereich 14 auf. Im Konfusorbereich 12 wird ein turbulenter (verwirbelter) Fluss des Flüssigmetalls 2 erzeugt. Die Verwirbelungen führen dazu, dass im Wechselwirkungsbereich 13 ein guter Wärmetransport der bei
35 der Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl 10 im Flüssigmetall 2 entstehenden Wärme erfolgt. In dem sich anschließenden Diffusorbereich 14 wird die Geschwindigkeit des Flusses ohne

große Reibungsverluste wieder auf die normale Größe zurückgeführt.

Aufgrund der Verwendung eines Flüssigmetalls 2, das bei Raumtemperatur fest ist und im Betriebsmodus flüssig, muss es immer vor Betrieb über seinen Schmelzpunkt erhitzt werden, damit eine zufrieden stellende Funktionsweise der Röntgenquelle gewährleistet wird. Dabei kommt der erfindungsgemäßen Pumpe 5 eine wichtige Rolle zu. Neben der klassischen Rolle einer Pumpe 5 – nämlich der Umwälzung des Flüssigmetalls 2 in der Leitung 3 – nimmt diese auch das Schmelzen und Erhitzen des Flüssigmetalls 2 wahr. Schließlich ist aufgrund der nötigen kompakten Bauweise der gesamten Flüssigmetallanode 1 – da sie auf das Kathodenpotential der Röntgenquelle gelegt werden muss – auch eine sehr kompakte Ausführung der Pumpe 5 nötig. Die vorgenannten Eckpunkte werden durch ein kontaktloses Grundprinzip erfüllt, das eine magnetohydrodynamische Kraft verwendet. Mit einer solchen Pumpe 5 kann ein Magnetwechsel-
feld unter der Verwendung eines Systems von Permanentmagneten erzeugt werden, die auf einer von einem konventionellen kleinen Wechselstrommotor angetriebenen Platte angeordnet sind. Die Vorteile einer solchen magnetohydrodynamischen Pumpe 5, die Dauermagnete nutzt, liegen in einer höheren Effizienz, keinen elektrischen Isolationsproblemen bei hohen Temperaturen, einer einfacheren Konstruktion und einem geringeren Gewicht sowie einer kleineren Abmessung. Wie oben schon ausgeführt, ist die Leitung 3 aus Molybdän, was eine geringe magnetische Permeabilität aufweist. Dadurch ist es möglich, dass die wechselnden Magnetfelder – die durch das Rotieren der Permanentmagneten erzeugt wird, durch die Leitung 3 hindurch tritt und dadurch im Flüssigmetall 2 eine Kraft induziert. Dies ist für den unten beschriebenen Auftaumodus wichtig.

Die Pumpe 5 ist über eine Abschirmung von dem Vakuumsystem der Röntgenröhre getrennt, so dass keine Wechselwirkung im elektromagnetischen System auftritt. Die erfindungsgemäße Pumpe 5 weist vier verschiedene Moden auf, nämlich einen Auf-

taumodus, einen Hochfahrmodus, einen Betriebsmodus und einen Herunterfahrmodus, die im Folgenden im Einzelnen beschrieben werden.

- 5 Wie oben beschrieben, muss aufgrund seines Schmelzpunktes oberhalb der Zimmertemperatur das Flüssigmetall 2 vor der Inbetriebnahme der Röntgenquelle erwärmt und geschmolzen werden. Um ein möglichst kompaktes System zu erhalten, wird dies im Ausführungsbeispiel durch die Pumpe 5 miterfüllt. In diesem Auf-
10 tauodus wird der Heizeffekt dadurch erzeugt, dass der Pumpenmotor stoßweise betrieben wird. Wenn ein wechselndes Magnetfeld in ein festes Metall induziert wird, bilden sich aufgrund der magnetohydrodynamischen Kräfte Wirbelströme. Da sich das Flüssigmetall 2 in seinem festen Zustand nicht bewegen kann, verteilen sich die Wirbelströme graduell und führen zu einer ohmschen Erwärmung des in fester Form vorliegenden Flüssigmetalls 2. Der stoßweise Betrieb der Pumpe 5 führt dazu, dass das schon geschmolzene Flüssigmetall 2 graduell Wärme auf das noch feste Flüssigmetall 2 abgibt. Der Auf-
15 tauodus wird beendet, wenn ein Temperaturfühler in der Nähe des Fokusbereichs 4 auf dem in Flussrichtung 7 pumpenfernen Ende signalisiert, dass der flüssige Zustand des Flüssigmetalls 2 erreicht wurde.
- 25 Im Hochfahrmodus wird der Pumpe 5 kontinuierlich elektrische Leistung zugeführt und auf das Flüssigmetall 2 übertragen. Die an die Pumpe 5 bei der nominellen Rotationsgeschwindigkeit übertragene elektrische Leitung wird gemessen. Wenn keine weitere Änderung in der elektrischen Leistungsaufnahme
30 erfolgt, hat das Flüssigmetall 2 seine normale Flussgeschwindigkeit erreicht.

Wenn dieser Hochfahrmodus beendet ist, kann der Betriebsmodus gestartet werden. In diesem Modus wird der Elektronenstrahl
35 10 auf das Flüssigmetall 2 im Fokusbereich 4 zur Erzeugung der Röntgenstrahlung geschossen. Dazu wird Hochspannung an die Röntgenquelle angelegt. Im Betriebsmodus wird auch Kraft

auf das Flüssigmetall 2 über die Pumpe 5 übertragen, um Reibungsverluste im Kreislauf zu kompensieren.

Nachdem die Hochspannung der Röntgenröhre abgeschaltet ist und kein Elektronenstrahl 10 mehr auf das Flüssigmetall 2 trifft, ist das Flüssigmetall 2 trotzdem noch stark erhitzt. Die Pumpe 5 arbeitet deswegen noch bei normaler Leistung weiter, bis die Temperatur des Fokusbereichs 4 unter einen vorgegebenen Schwellenwert gefallen ist. Als Schwellenwert wird bevorzugt eine Temperatur genommen, die 50°C über dem Schmelzpunkt des verwendeten Flüssigmetalls 2 liegt. Somit ergibt sich als Schwellenwert bei der Verwendung von BiPb 175°C und bei der Verwendung von BiPbInSn ein Schwellenwert von 105,5°C. Wird dieser Schwellenwert unterschritten, wird die elektrische Leistung der Pumpe schrittweise herabgesetzt, um Druckwellen des Flüssigmetalls 2 innerhalb der Leitung 3 zu vermeiden. Dadurch wird eine erhebliche Verlängerung der Lebenszeit der Flüssigmetallanode 1 erreicht, da insbesondere das sehr dünne druckanfällige Elektronenfenster 8 keinen Schaden nimmt.

Als letztes Element der Flüssigmetallanode 1 wird die Kühlung 6 beschrieben. Es handelt sich hierbei um einen kompakten Querstrom-Wärmetauscher in Minikanalbauweise aus Molybdän. Der hydraulische Durchmesser der Kanäle beträgt zwischen 0,3 und 3 mm. Das heiße Flüssigmetall 2 wird in dem nur geringen zur Verfügung stehenden Volumen von einigen cm³ gekühlt. Im Sekundärkühlkreislauf wird ein Öl verwendet, das hochspannungsresistent und hitzebeständig bei mittleren Temperaturen ist so dass keine elektrischen Durchschläge auftreten. Solche Wärmetauscher sind in der Literatur bekannt und werden deswegen im Folgenden nicht näher beschrieben.

Der erfindungsgemäße Röntgenstrahler weist somit eine Kathode 9 zur Emission eines Elektronenstrahls 10 auf, der beim Auftreffen auf die Flüssigmetallanode 1 zur Röntgenstrahlenemission führt.

Bezugszeichenliste

1	Flüssigmetallanode
2	Flüssigmetall
3	Leitung
4	Fokusbereich
5	Pumpe
6	Kühlung
7	Flussrichtung
8	Elektronenfenster
9	Kathode
10	Elektronenstrahl
11	Hochspannungsisolator
12	Konfusorbereich
13	Wechselwirkungsbereich
14	Diffusorbereich
15	Anodenmodul

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb einer magnetohydrodynamischen Pumpe
5 (5) für eine Flüssigmetallanode (1) einer Röntgenquelle,
wobei sie in mindestens zwei Moden betrieben wird,
wobei der erste Modus ein Auftaumodus ist, in dem das
Flüssigmetall (2) in einer Leitung (3) der Flüssigmetall-
anode (1) geschmolzen wird,
10 der zweite Modus ein Betriebsmodus ist, in dem das Flüssigmetall (2) durch die Leitung (3) gepumpt wird und die
Erzeugung von Röntgenstrahlen erfolgt,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Motor der Pumpe (5) im Auftaumodus ständig abwechselnd an- und ausgeschaltet wird.
15
2. Verfahren gemäß Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
dass im Auftaumodus über einen Sensor erfasst wird, ob
der flüssige Zustand des Flüssigmetalls (2) erreicht ist.
20
3. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Patentansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass ein dritter Modus als Hochfahrmodus zwischen dem Auftaumodus und dem Betriebsmodus
vorhanden ist, in dem die Rotationsgeschwindigkeit der
25 Pumpe (5) gesteigert wird.
4. Verfahren gemäß Patentanspruch 3, dadurch gekennzeichnet,
dass die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) gesteigert wird, bis das Flüssigmetall (2) seine normale Flussgeschwindigkeit aufweist.
30
5. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Patentansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass ein vierter Modus als Herunterfahrmodus nach dem Betriebsmodus vorhanden ist, in dem
nach der Erzeugung von Röntgenstrahlen die Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe (5) stufenweise verringert wird.
35

6. Verfahren gemäß Patentanspruch 5, dadurch gekennzeichnet,
dass die stufenweise Verringerung der Rotationsgeschwin-
digkeit der Pumpe (5) erst erfolgt, wenn die Temperatur
des Fokusbereichs (4) unter einen vorgebbaren Schwellen-
wert sinkt.
7. Verfahren gemäß Patentanspruch 6, dadurch gekennzeichnet,
dass der Schwellenwert 50°C über dem Schmelzpunkt des
Flüssigmetalls (2) liegt.
8. Flüssigmetallanode (1) für eine Röntgenquelle mit einem
Flüssigmetall (2), das sich in einer Leitung (3) befin-
det,
wobei ein Anodenmodul (15), im Fokusbereich (4) in die
Leitung (3) eingesetzt ist,
mit einer Pumpe (5) zum Umwälzen des Flüssigmetalls (2)
in der Leitung (3)
sowie mit einer Kühlung (6) für das Flüssigmetall (2),
dadurch gekennzeichnet, dass
in das Anodenmodul (15) ein Elektronenfenster (8) einge-
setzt ist
und die Pumpe (5) nach einem Verfahren gemäß einem der
vorstehenden Patentansprüche als eine magnetohydrodynamische
Pumpe (5) betreibbar ist.
9. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 8, dadurch
gekennzeichnet, dass als Flüssigmetall (2) eine Bi-Legie-
rung, insbesondere BiPb oder BiPbInSn, verwendet wird.
10. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 9, dadurch
gekennzeichnet, dass der Gewichtsanteil des Bi in des
BiPb-Legierung zwischen 50 und 60 Gew.%, insbesondere bei
55,5 Gew.%, liegt und der Rest Pb ist.
11. Flüssigmetallanode (1) gemäß Patentanspruch 9, dadurch
gekennzeichnet, dass die BiPb-Legierung einen Anteil Bi

von 49,4 Gew.%, Pb von 18,8 Gew.%, In von 21,0 Gew.% und Sn von 11,6 Gew.% aufweist.

- 5 12. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Leitung (3) aus Molybdän ist.
- 10 13. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Anodenmodul (15) vollständig aus Molybdän ist, in das ein Elektronenfenster (8) eingesetzt ist, das aus lichtdurchlässigem kubischen Bornitrid besteht.
- 15 14. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Elektronenfenster (8) eine Dicke von 10 - 80µm, insbesondere von 40µm, aufweist.
- 20 15. Flüssigmetallanode (1) gemäß einem der Patentansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Kühlung (6) ein Querstrom-Wärmetauscher im Minikanalbauweise ist.
- 25 16. Röntgenstrahler mit einer Kathode (9) zur Emission eines Elektronenstrahls (10) und einem beim Auftreffen des Elektronenstrahls (10) Röntgenstrahlen emittierenden Flüssigmetallanode (1) nach einem der Patentansprüche 8 bis 15.

1/1

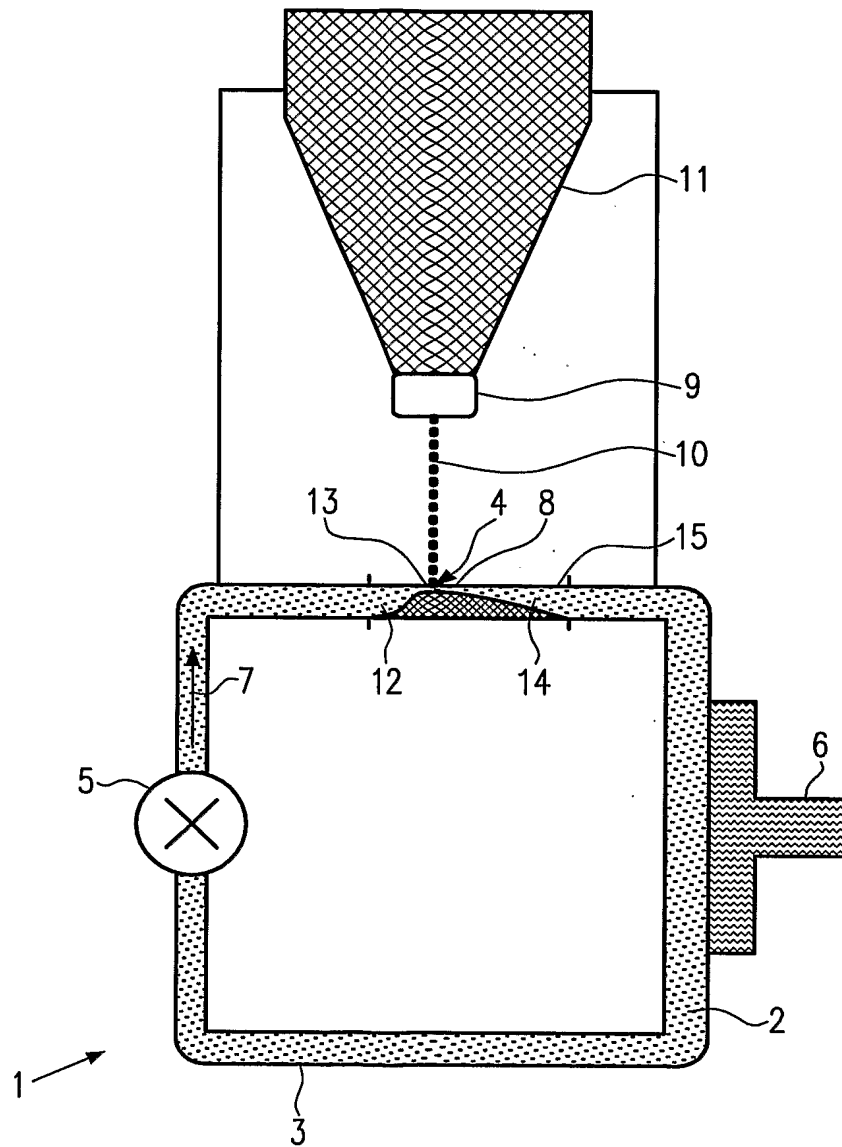


Fig. 1